# Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit der Agfa-Farbenplatte.

**Inaugural-Dissertation**
**zur Erlangung der Doktorwürde**

der

**Hohen Philosophischen Fakultät**
**der Philipps-Universität zu Marburg**

vorgelegt von

KARL ACKERMANN
**aus Pfullendorf.**

---

**Marburg 1928**
Buchdruckerei Georg Jacob, Mannheim

Als Dissertation angenommen am 26. September 1926.

Berichterstatter: Herr Professor Dr. Cl. Schaefer.

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Oktober 1926.

---

Gedruckt mit Genehmigung der Fakultät.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

*Sonderdruck aus*
*„Zeitschrift für technische Physik".*
*Achter Jahrgang. Nr. 1 und 2. 1927.*
*Verlag von Johann Ambrosius Barth.*

# Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit der Agfa-Farbenplatte

Von Cl. Schaefer und K. Ackermann

(Hierzu Tafel I)

Inhalt: Es wird die Leistungsfähigkeit der Agfa-Farbenplatte dadurch geprüft, daß ein Ostwaldscher Farbkreis im Original mit farbigen Aufnahmen desselben, die unter verschiedenen Bedingungen hergestellt wird, nach Farbton, Sättigung und Helligkeit verglichen wird. Im Anschlusse daran werden grundsätzliche Fragen über die Leistungsfähigkeit der Farbenphotographie überhaupt diskutiert.

## I. Die Young-Helmholtzsche Farbentheorie

### § 1. Die Gesetze der Farbenmischung und die Charakterisierung der Farben durch Koordinaten

Newtons Versuche über die Zerlegung des weißen Lichtes in Spektralfarben haben namentlich auf die Farbentheorie außerordentlich befruchtend gewirkt. Hatte man bis dahin Versuche über Farbenmischung vornehmlich mit farbigen Pulvern angestellt, so konnte man jetzt Mischungen von reinen Spektralfarben herstellen, an denen die Gesetze der Farbenmischung viel reiner hervortreten als bei Mischungen von Farbenpulvern.

Die Mischungsversuche mit Spektralfarben ergaben folgendes: Mischt man zwei Spektralfarben, welche im Spektrum nicht weit auseinander liegen, so entstehen Farben, welche mit den dazwischenliegenden Spektralfarben farbtongleich sind, aber nicht deren volle Sättigung besitzen. Neue, dem Spektrum fremde Farbtöne, erhält man also bei der Mischung von benachbarten Spektralfarben nicht. Nur bei Mischungen von zwei Spektralfarben, die je einem Ende des Spektrums angehören, ergeben sich Farbtöne, welche im Spektrum nicht vorkommen, die sogenannten Purpurtöne, und zwar fallen diese um so gesättigter aus, je näher die beiden Komponenten dem Ende des Spektrums liegen. Gänzlich neue Farben kann man dagegen durch Mischung von zwei Spektralfarben überhaupt nicht erhalten.

Aber auch, wenn drei oder mehr Spektralfarben miteinander zur Mischung gebracht werden, kommt man aus dem Bereich der bekannten Farben nicht heraus. Vielmehr zeigt sich, daß bei geeigneter Wahl dieser drei Spektralfarben sämtliche Farben aus ihnen mischbar sind. Allerdings ist es durch keine Wahl dieser drei Grundfarben möglich, alle Farben in ihrer vollen Sättigung herzustellen. Am ehesten gelingt dies noch, wenn man als Grundfarben die Endlichter des Spektrums und ein mittleres spektrales Grün wählt. Mit diesen drei Farben lassen sich z. B. sämtliche Purpurfarben und die meisten Körperfarben genau wiedergeben.

Mit der Erkenntnis der Mischbarkeit aller Farben aus drei Grundfarben ergibt sich sogleich die Möglichkeit, jede Farbe eindeutig durch Koordinaten zu charakterisieren. Dies kann in folgender Weise geschehen: Für die drei oben gewählten Grundfarben — spektrales Endrot und Endblau, mittleres spektrales Grün — setzen wir willkürlich je eine Einheit fest. Durch Mischung dieser drei Grundfarben ahmen wir die zu untersuchende Farbe genau nach, d. h. wir stellen eine Farbengleichung her. Die Angabe der Anteile $x_1$, $x_2$, $x_3$ der Grundfarben in der Mischung legt dann offenbar die betreffende Farbe in eindeutiger Weise fest. Wie erwähnt, ist es bei den sehr gesättigten Farben nicht immer möglich, eine Farbengleichung ohne weiteres zu erzielen. Hier gelingt es aber stets, durch Mischung zweier Grundfarben den Farbton der betreffenden Farbe herzustellen und dann durch Hinzufügen der dritten Grundfarbe zu ihr selbst völlige Farbengleichheit zu erhalten. Bei solchen Farben wird eine Koordinate negativ.

In dieser Weise kann man jeder Farbe drei Koordinaten eindeutig zuordnen. Eine proportionale Änderung der Koordinaten einer Farbe ändert nur die Helligkeit der betreffenden Farbe (wenigstens solange es sich um das normale Tagessehen handelt), nicht aber die Farbqualität selbst. Wenn man von der Helligkeit einer Farbe absieht, so genügt demnach zu ihrer Festlegung schon die Angabe des Verhältnisses der drei Farbkoordinaten, d. h. die Angabe zweier Koordinaten.

### § 2. Die wahren Grundfarben

Die Mischungsgesetze sind auch bestimmend gewesen für unsere Vorstellungen von den physiologischen Vorgängen im sehenden Auge. Die Möglichkeit der Herstellung aller Farben aus drei Grundfarben legte die Annahme nahe, daß auch im Auge die Gesamtempfindung durch Übereinanderlagerung dreier elementarer Vorgänge zustande kommt; und zwar soll der eine Vorgang vornehmlich durch das rote, der zweite vornehmlich durch das grüne und der dritte durch das blaue Licht angeregt werden. Jede Farbe soll aber alle drei Grundprozesse gleichzeitig auslösen, und nur die Stärke der Anregung soll von Farbe zu Farbe wechseln. Daher bewirken die reinen Grundprozesse Farbenempfindungen, wie sie unter den reellen Farben gar nicht vorkommen. Diese Theorie wurde von Thomas Young aufgestellt und durch die Arbeiten von Helmholtz begründet und zur herrschenden Lehre der physio-

logischen Seite des Farbensehens erhoben, sofern man von der Heringschen Theorie absieht, die hier, als für quantitative Messungen nicht geeignet, bewußt außer acht gelassen wird. Eine wesentliche Stütze findet sie in den Beobachtungen, die bei partiell Farbenblinden gemacht wurden. Das anomale Sehen derselben kann man sich zwanglos durch das völlige Fehlen eines der drei Grundprozesse erklären.

Aus den Farbengleichungen der partiell Farbenblinden kann man die Farben, welche den Grundprozessen entsprechen, die sogenannten „wahren Grundfarben", ableiten und ihre auf die drei reellen Eichlichter (Endrot, Endblau, mittleres spektrales Grün) bezogenen Koordinaten angeben. Damit ist demnach die Möglichkeit gegeben, die Koordinaten sämtlicher Farben auf die „wahren Grundfarben" umzurechnen. Die Einheiten, in welchen die Grundfarben gemessen werden sollen, pflegt man dabei so festzusetzen, daß die Koordinaten des Sonnenlichts = 1 werden.

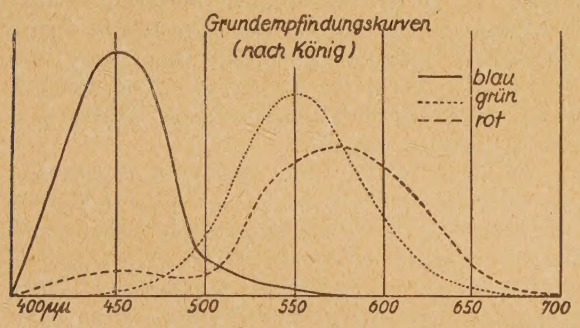


Abb. 1

Die Abb. 1 zeigt die auf die „wahren Grundfarben" bezogenen Koordinaten des Normalspektrums des Sonnenlichtes. Als Abszissen sind die Wellenlängen, als Ordinaten die Koordinaten der betreffenden Farbe aufgetragen. Die Form der drei Kurven — man nennt sie allgemein Grundempfindungskurven — ist natürlich dem Sonnenlicht eigentümlich und ist eine Folge seiner Energieverteilung. Die Flächeninhalte der drei Kurven geben offenbar die Gesamterregung durch das unzerlegte Sonnenlicht an und müssen daher einander gleich sein, entsprechend der Normierung der Grundfarben.

Ein besonderer Vorteil der nicht reellen Grundfarben ist der, daß die auf sie bezogenen Farbkoordinaten sämtlich positiv sind. Bei der Annahme reeller Grundfarben würden dagegen bei den gesättigten Farben negative Koordinaten auftreten. Zu ihrer Deutung müßte man schon annehmen, daß die Grundprozesse auch in entgegengesetztem Sinne verlaufen können. Dazu tritt von vornherein die Schwierigkeit, daß die Wahl der reellen Grundfarben sich gar nicht in naturgemäßer und eindeutiger Weise ergibt, sondern in hohem Maße willkürlich ist.

Mit Hilfe der Grundempfindungskurven kann man leicht die Koordinaten jedes farbigen Lichtes angeben, sobald man seine physikalische Zusammensetzung im Vergleich zum Sonnenlicht ermittelt hat. Wird diese durch die Funktion $f(\lambda)$ ausgedrückt, so braucht man nur $f(\lambda)$ für jede Wellenlänge $\lambda$ mit den Ordinaten der drei Grundempfindungskurven zu multiplizieren; die Flächeninhalte der so entstehenden neuen Kurven geben dann die Koordinaten der betreffenden Farbe an. In dieser Weise kann jede beliebige Farbe durch Koordinaten in eindeutiger Weise festgelegt werden.

## § 3. Die geometrische Darstellung der Farben

Zur Charakterisierung einer Farbe genügt die Angabe des Verhältnisses der Grunderregungen, also zweier unabhängiger Größen, sofern man von ihrer absoluten Helligkeit absieht. Geometrisch könnte man daher die Farben mit Hilfe eines rechtwinkligen Koordinatensystems in einer Ebene zur Darstellung bringen. In der Literatur ist indessen eine andere, weniger spezielle Art der Darstellung üblich, welche insofern naturgemäßer ist, als sie die drei Grundfarben selbst deutlicher hervortreten läßt. Bei dieser Darstellung werden die drei Grunderregungen $x_1$, $x_2$, $x_3$ als projektive, homogene Koordinaten in der Ebene aufgefaßt. Ein projektives, ebenes Koordinatensystem besteht bekanntlich aus einem Koordinatendreieck und einem Einheitspunkt, die beide willkürlich wählbar sind. In der Farbentheorie ist es üblich, als Einheitspunkt den Schwerpunkt des Koordinatendreiecks zu wählen. Außerdem pflegt man das Koordinatendreieck gleichseitig anzunehmen. Diese spezielle Wahl des Koordinatendreiecks bringt es mit sich, daß der Weißpunkt (Einheitspunkt) gleichzeitig Schwerpunkt und Mittelpunkt des Koordinatendreiecks wird.

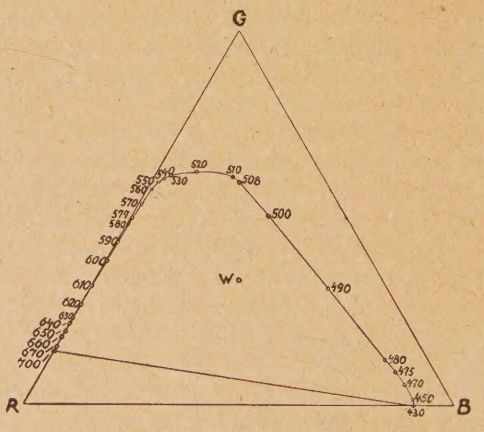


Abb. 2. Lage der Spektralfarben im Farbendreieck

Die Abb. 2 zeigt die Lage der Spektralfarben im Farbdreieck. Infolge der Wahl des Schwerpunkts als Einheitspunkt fällt die Lage einer Farbe $x_1, x_2, x_3$ im Farbendreieck zusammen mit dem Schwerpunkt des Koordinatendreiecks, wenn man sich an dessen Endpunkten $R$, $G$, $B$ die Massen $x_1, x_2, x_3$ angebracht denkt. Daraus entspringt ein besonders praktisches Verfahren zur Eintragung einer Farbe $x_1, x_2, x_3$ in das Farbdreieck: Man macht etwa den Punkt $R$ zum Nullpunkt eines rechtwinkligen Koordinatensystems $\xi\,\eta$ und legt dessen $\xi$-Achse in die Richtung $RB$. Die Lage der Farbe $(x_1, x_2, x_3)$ bestimmt man dann einfach dadurch, daß man den Schwerpunkt der in den Punkten $R$, $G$, $B$ gedachten Massen $x_1, x_2, x_3$ in den kartesischen Koordinaten $\xi\,\eta$ angibt. Ist die Seitenlänge des Koordinatendreiecks = 1, so gilt:

$$\xi = \frac{1}{2}\,\frac{x_2 + 2\,x_3}{x_1 + x_2 + x_3}, \qquad \eta = \frac{1}{2}\,\frac{x_2\sqrt{3}}{x_1 + x_2 + x_3}.$$

Der Schwerpunktsatz gilt natürlich auch für beliebte Mischfarben. Zwei Farben $F$ und $F'$ mit den Koordinaten $x_1, x_2, x_3$ und $x_1', x_2', x_3'$ ergeben beim Mischen eine Farbe, welche im Schwerpunkt des Systems mit der Masse $(x_1 + x_2 + x_3)$ im Punkte $F$ und der Masse $(x_1' + x_2' + x_3')$ in $F'$ liegt.

Außer durch die Grunderregungen werden die Farben vielfach durch Angabe von Farbton und Sättigung (und Helligkeit, wovon hier abgesehen wird) charakterisiert. Diese Darstellungsform hat vielleicht den Vorzug, daß sie leichter eine Vorstellung über das Aussehen der Farben entstehen läßt. Legt man im Farbdreieck durch den Weißpunkt und irgendeine Spektralfarbe eine Gerade, so kann man sich alle auf dieser Geraden liegenden Farbpunkte durch Mischung dieser Spektralfarbe mit Weiß entstanden denken. Man sagt von diesen Farben, sie hätten denselben Farbton wie die betreffende Spektralfarbe. Den Farbton einer Farbe kann man demnach durch die Wellenlänge desjenigen Spektrallichtes definieren, aus welchem sie durch Verdünnung mit Weiß entsteht. Zur vollständigen Festlegung einer Farbe genügt die Angabe des Farbtons allein nicht. Vielmehr muß noch ein zweites Bestimmungsstück hinzutreten. Als solches könnte z. B. das Verhältnis dienen, in welchem die betreffende Farbe aus Weiß und der auf dem Rande des Farbdreiecks gelegenen, unverdünnten Farbe gleichen Farbtons gemischt ist. Es ist üblich, statt dessen den Quotienten

$$\frac{\text{Gehalt an reiner Farbe}}{\text{Weißgehalt} + \text{Farbgehalt}}$$

als zweites Bestimmungsstück zu benutzen. Diese Größe nennt man die „Sättigung“ der betreffenden Farbe. Definitionsgemäß drückt sich die Sättigung einer Farbe $(x_1, x_2, x_3)$ durch die Grunderregungen im Falle $x_1 < x_2$, $x_1 < x_3$ folgendermaßen aus:

$$s = \frac{(x_2 - x_1) + (x_3 - x_1)}{x_1 + x_2 + x_3} = \frac{x_3 + x_2 - 2\,x_1}{x_1 + x_2 + x_3}.$$

Durch Angabe von Farbton und Sättigung ist die Lage einer Farbe im Farbdreieck offenbar vollständig bestimmt.

## II. Die Leistungen der Agfa-Farbenplatte

### § 4. Die Photographie in natürlichen Farben

Hatten die Gesetze der Farbenmischung zu einer koordinatenmäßigen Charakterisierung der Farben und auch zu einer Vorstellung der physiologischen Vorgänge beim Sehen geführt, so sind sie anderseits auch in praktischer Hinsicht vielfach von Bedeutung geworden. Eine der bekanntesten Anwendungen haben die Mischungsgesetze bei der Photographie in natürlichen Farben gefunden. Diese beruht im Prinzip auf der Mischbarkeit der meisten reellen Farben aus drei reellen Grundfarben Rot, Grün und Blau. Die technische Seite des Verfahrens besteht in folgendem: Unmittelbar über der photographischen Schicht der Platte und mit ihr fest verbunden befindet sich ein Farbfilter, welches in buntem Durcheinander aus einer großen Anzahl roter, grüner und blauer Felder besteht. Ein solches Filter erzielt man praktisch durch Nebeneinanderlagern von scheibenförmigen, gefärbten Harz- oder Stärkekörnchen. Diese Körner sind so klein, daß sie mit dem Auge nicht mehr einzeln erkannt werden können. Die von benachbarten Feldern ausgehenden Strahlen mischen sich daher im Auge, so daß das Filter selbst in einer einheitlichen weißlichen Farbe erscheint.

Wenn nun irgendwelches Licht auf eine derartige photographische Platte fällt, so muß es zuerst die Filterschicht durchsetzen. Rotes Licht wird dabei in der Hauptsache nur von den roten Feldern des Filters durchgelassen werden und nur hinter diesen auf die lichtempfindliche Schicht einwirken können. Entsprechend wird grünes Licht im wesentlichen nur von den grünen Körnern durchgelassen werden. Allgemein wird jedes farbige Licht diejenigen Filterteile am besten zu durchdringen vermögen, denen es hinsichtlich seiner spektralen Zusammensetzung am nächsten steht. Beim Entwickeln der Platte werden zunächst die belichteten Teile der photographischen Schicht geschwärzt. Durch einen zweiten Prozeß werden die geschwärzten Teile weggelöst und hiernach die Platte stark belichtet, so daß die bei der Aufnahme unbelichteten Teile der Platte bei nochmaliger Entwicklung dunkel werden. Man übersieht, daß die ganze Wirkung offenbar in einer Aufhellung der Platte an den belichteten

Stellen besteht. Plattenteile, die bei der Aufnahme von rotem Licht getroffen wurden, werden am stärksten hinter den roten Körnern aufgehellt. Bei der Betrachtung im durchfallenden Licht werden diese Stellen daher eine vorwiegend rote Färbung zeigen. Man erkennt, daß in dieser Weise Färbungen der Platte entstehen, welche dem auffallenden Lichte zum mindesten ähnlich sein werden.

Derartige photographische Aufnahmen überraschen oft durch ihre schöne Farbenwirkung. Doch hat man sich bis jetzt bei der Beurteilung der Farbenwiedergabe mehr auf den unmittelbaren Eindruck gestützt. Das Auge läßt sich indessen in dieser Hinsicht in hohem Maße täuschen. Vor allen Dingen ist es bei unmittelbarer Betrachtung der Gesamteindruck der Photographie, das Zusammenwirken der verschiedenen Farben, welcher unser Urteil über die Güte des Bildes bedingt und etwaige Mängel in der naturgetreuen Wiedergabe der einzelnen Farben leicht übersehen läßt. Der Gesamteindruck kann aber bei nicht vollständig farbentreuer Wiedergabe ebensogut sein, wie das beim Objekt der Fall war. So kommt es, daß die Farbenaufnahmen bis jetzt mehr nach ästhetischen Gesichtspunkten beurteilt wurden und die Frage nach der naturgetreuen Wiedergabe der einzelnen Farben mehr oder weniger zurückgetreten ist. In der vorliegenden Arbeit soll daher diese Frage näher geprüft und der Versuch gemacht werden, die Leistungen einer Farbenplatte in objektiver Weise zur Darstellung zu bringen.

Dies kann in der Weise geschehen, daß man eine Reihe möglichst verschiedener Farben photographiert, sowohl Original und Bild koordinatenmäßig bestimmt und ihre Lagen im Farbdreieck festlegt.

## § 5. Die Photographie des Farbkreises *n c*

Da es bei der praktischen Anwendung der Farbenphotographie sich meist um die Aufnahme von Körperfarben handelt, so liegt es nahe, solche Farben zur Untersuchung zu benutzen. Eine reiche Auswahl derartiger Farben findet man im Ostwaldschen Farbenatlas. Aus diesem wurde der gesättigste, vollkommen vorhandene Farbkreis *n c* herausgegriffen und durch Auswahl jedes vierten Blättchens auf 25 Pigmente reduziert. Es galt zunächst, die Lage dieser Pigmente im Farbdreieck festzulegen. Zur Berechnung der Farbkoordinaten eines Pigmentes muß man seine Remissionsfunktion kennen. Die Remissionsfunktion $R(\lambda)$ wurde bei einer größeren Anzahl von Farbtäfelchen des Farbkreises *n c* bereits von K. W. F. Kohlrausch[1]) und A. Gibsone[2]) bestimmt; sie photometrierten die betreffenden Pigmente mit einem König-Martensschen Spektralphotometer gegen ein rein weißes Pigment. Aus der Remissionsfunktion $R(\lambda)$ eines Pigmentes berechnen sich nach I § 2 seine Grunderregungen nach den Formeln

$$r = \int R(\lambda) x_1(\lambda)\, d\lambda, \quad g = \int R(\lambda) x_2(\lambda)\, d\lambda, \quad b = \int R(\lambda) x_3(\lambda)\, d\lambda.$$

Hier bedeuten $x_1(\lambda)$, $x_2(\lambda)$, $x_3(\lambda)$ die Funktionen, welche die Grundempfindungskurven analytisch darstellen. Nach I § 3 bestimmt man die Lage der Pigmentfarben im Dreieck aus den Grunderregungen mit Hilfe der Formeln

$$\xi = \frac{1}{2}\,\frac{g + 2b}{r + g + b}, \qquad \eta = \frac{1}{2}\,\frac{g\sqrt{3}}{r + g + b}.$$

Dabei ist das Hilfskoordinatensystem $\xi\,\eta$ mit seiner $\xi$-Achse in die Richtung $RB$ gelegt, während der Koordinatenursprung in $R$ liegt. Die Abb. 3 zeigt

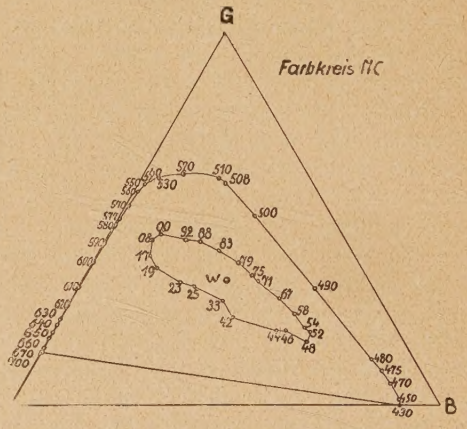


Abb. 3. Lage des Farbkreises *n c* im Farbendreieck

die Farben einer Reihe von Pigmenten. Die Zahlen bedeuten die Ordnungszahlen, welche den betreffenden Pigmenten in der Ostwaldschen Systematik zukommen. Es ist auffallend, wie wenig gesättigt diese Pigmente im Vergleich zu den Spektralfarben sind, obwohl sie doch zu den gesättigsten Farben gehören, welche in der Natur vorkommen. Der Grund dafür liegt darin, daß diese Pigmente alle Spektralfarben merklich remittieren und das Gebiet maximaler Remission ziemlich breit ist.

Von den 25 ausgewählten Pigmenten wurde zunächst eine normal belichtete Photographie hergestellt. Der unmittelbare Anblick der Aufnahme läßt keine großen Farbunterschiede gegenüber dem Original erkennen. Auffallend ist höchstens die satte Farbe der hellgrünen Farbtöne. Vom theoretischen Standpunkt läßt sich über die bei der Photographie zu erwartendeu Farben nur das eine mit Sicherheit voraussagen:

[1]) K. W. F. Kohlrausch, Physik. Zeitschr. **21** (1920), 396.

[2]) Mitgeteilt in: C. Schaefer, Physik. Zeitschr. **26** 1925), 908.

alle Farben, die man durch photographische Aufnahmen überhaupt erhalten kann, müssen im Farbdreieck innerhalb des aus den drei Rasterfarben gebildeten Dreiecks liegen. Das folgt einfach aus der Tatsache, daß alle Farbtöne der Photogramme aus den Farben des Rasters gemischt sind.

Zur Bestimmung der Koordinaten der Photogramme mußten ihre Durchlässigkeitskurven aufgenommen werden. Die genaue Messung der Durchlässigkeitskurven erforderte eine sehr starke Beleuchtung der Photogramme, da diese selbst an den Stellen maximaler Durchlässigkeit nur etwa 4 % des auffallenden Lichtes durchlassen. In Gebieten geringer Durchlässigkeit sinkt die Menge des austretenden Lichtes unter $^1/_2$ %. Damit an solchen Stellen die Messungen noch möglich sind, muß mit einer sehr starken Lichtquelle gearbeitet werden. Insbesondere für solche Photogramme, welche im Gebiet der blauen Strahlen minimale Durchlässigkeit besitzen, ist eine starke Beleuchtung erforderlich, da die blauen Strahlen nur eine geringe Helligkeit besitzen und zudem im Spektrum einer künstlichen Lichtquelle verhältnismäßig schwach vertreten sind. Mit der in Abb. 4 wiedergegebenen Anordnung konnte die zur Messung notwendige Helligkeit leicht erreicht werden. Die von der punktförmigen Lichtquelle $L$ ausgehenden Strahlen wurden durch den Kondensor $K$ (6 cm Durchmesser) parallel gemacht und fielen nach dem Durchlaufen des Wasserkastens $W$ auf die Glasplatte $G$. Hier teilte sich der Strahlengang in die Wege I und II. Das Licht des Weges II diente bei der Photometrie als Vergleichslicht. Durch die Linse $L_1$ (7,5 cm Durchmesser, 20 cm Brennweite) wurden die Strahlen wieder zu einem Bild der Lichtquelle vereinigt, welches die Blende $B_1$ überdeckte. Unmittelbar hinter der Blende wurden die zu messenden Photogramme gebracht. Die Blendenöffnung $B_1$ hatte dieselbe rechteckige Form (4 und 6 mm Seitenlänge) wie die Photogramme, war aber etwas kleiner als diese, so daß falsche Strahlung von ihr zurückgehalten wurde. Durch die Linse $L_2$ (4 cm Durchmesser, 12,5 cm Brennweite) wurde die Blendenöffnung $B_1$ auf den einen Spalt eines König-Martensschen Spektralphotometers schwach verkleinert abgebildet. Ganz

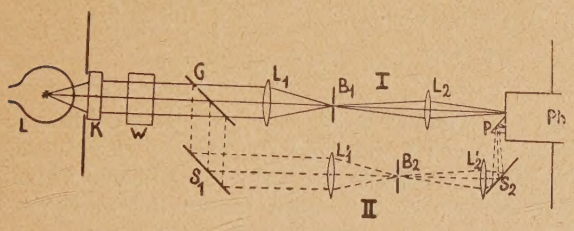


Abb. 4. Anordnung zur Bestimmung der Durchlässigkeit photographierter Farbkreise

entsprechend ist der Lichtweg II aufgebaut, nur daß dort die Abbildung der Blendenöffnung $B_2$ auf den Photometerspalt auf dem Wege über den Spiegel $S_2$ und das Reflektionsprisma $P$ erfolgte. Störendes Licht wurde durch verschiedene Schirme gut abgeblendet.

Bei dem Aufbau der Apparatur hat man vor allen Dingen darauf zu achten, daß die Richtung der Strahlen I und II (nach Reflexion an $P$) mit der optischen Achse des Photometers zusammenfällt, da sonst das Gesichtsfeld nicht gleichmäßig hell erscheint. Man erreicht das am besten, indem man den Okularspalt des Photometers beleuchtet und die Lichtquelle $L$ so aufstellt, daß sie gerade auf dem aus dem einen Objektivspalt direkt austretenden Strahlenbündel liegt. Das Prisma $P$ und die Spiegel $S_1$ und $S_2$ werden dann so gerichtet, daß auch die aus dem zweiten Spalt austretenden Strahlen die Lichtquelle $L$ treffen und außerdem die Achsen der Lichtwege I und II in einer horizontalen Ebene liegen. Erst hiernach werden die Blenden und zuletzt die Linsen eingesetzt.

Als Lichtquelle wurde zuerst eine Bogenlampe benutzt. Eine solche hat, abgesehen von der Unbequemlichkeit ihrer Handhabung, den Nachteil, daß sich die leuchtenden Kohlenspitzen nicht immer an derselben Stelle befinden. Zudem läßt sich ihre Intensität nicht beliebig ändern. Es wurde daher bald zu einer 300-Watt-Osram-Projektionslampe gegriffen. Da die kleinen, eng nebeneinander liegenden Spiralen der Glühbirne keine homogene leuchtende Fläche bilden, so war trotz richtiger Justierung kein gleichmäßig beleuchtetes Gesichtsfeld zu erzielen. Die Blendenöffnungen $B_1$ und $B_2$ wurden daher mit einer Mattscheibe überdeckt. Denselben Dienst leistete bereits mattes, durchsichtiges Papier, bei welchem der Lichtverlust durch Zerstreuung wesentlich geringer war.

Die Messung der Durchlässigkeit geschieht bekanntlich folgendermaßen: Man vergleicht zunächst die Intensitäten $J_1$ und $J_2$ der Strahlen I und II über das ganze Spektrum. Wird die Nikolstellung, bei der gleiche Helligkeit der beiden Hälften des Gesichtsfeldes eintritt, durch den Winkel $\alpha_0$ gegeben, so gilt: $\frac{J_1}{J_2} = \mathrm{tg}^2\,\alpha_0$. Hierauf bringt man das zu messende Photogramm unmittelbar hinter die Blende $B_1$, stellt den Nikol ein und liest den zugehörigen Winkel $\alpha$ ab. Dann ist $\mathrm{tg}^2\,\alpha = \frac{J_1'}{J_2}$, wo $J_1'$ die Intensität des durchgelassenen Lichtes bedeutet. Der Quotient $\frac{\mathrm{tg}^2\,\alpha}{\mathrm{tg}^2\,\alpha_0} = \frac{J_1'}{J_1}$ gibt somit die Durchlässigkeit an. In dieser Weise wurde die Durchlässigkeit der

Photogramme über das ganze sichtbare Spektrum von 430 $\mu\mu$ bis 700 $\mu\mu$ (in Abständen von 10 $\mu\mu$) gemessen. Die Photometerspalte waren etwa 0,4 mm breit. Diese verhältnismäßig große Breite der Spalte bringt es mit sich, daß im Gebiet starker Änderung der Durchlässigkeit das von der Photographie beleuchtete Gesichtsfeld von oben nach unten heller oder dunkler wird, je nachdem die Durchlässigkeitskurve daselbst fällt oder ansteigt (in Richtung wachsender Wellenlängen). Infolge der großen Spaltbreite wird die Durchlässigkeitskurve natürlich etwas verwaschen, ein Umstand, der bei dem hier beabsichtigten Zweck keine Rolle spielte gegenüber dem Vorteil größerer Lichtstärke. Eine sehr geringe Breite des Objektivspaltes empfiehlt sich auch deshalb nicht, weil die Verteilung der verschiedenen Körner des Rasters durch den Zufall bedingt und nur im Mittel richtig ist, so daß bei zu geringer Spaltbreite Schwankungen auftreten können. Aus diesem Grunde tut man auch gut, die Photogramme verkleinert auf dem Spalt abzubilden. Durch einen Widerstand wurde die Beleuchtung in dem nichtblauen Spektralbereich passend gedämpft, so daß man immer im Gültigkeitsbereich des Fechnerschen Gesetzes blieb. Im blauen Teil des Spektrums ließ, infolge der stärkeren Brechkraft des Auges für diese Strahlen, die Sehschärfe bedeutend nach. Die Anwendung einer schwachen Zerstreuungslinse half dem ab.

Bei der Berechnung der Durchlässigkeitskurve wurde der Winkel $\alpha_0$ für das ganze Spektrum konstant angenommen. In Wirklichkeit zeigte er einen merklichen, wenn auch kleinen Gang, da die Lichtwege I und II nicht ganz symmetrisch aufgebaut sind. Diese Vernachlässigung konnte um so eher gestattet werden, als die Durchlässigkeit im blauen Ende sich höchstens auf 10 % angeben läßt; gerade die blauen Strahlen sind aber für die Farbe des betreffenden Lichtes von großem Einfluß, da die Königsche Grundempfindungskurve für die Blauerregung im Gebiet der blauen Strahlung ein sehr stark ausgeprägtes Maximum hat.

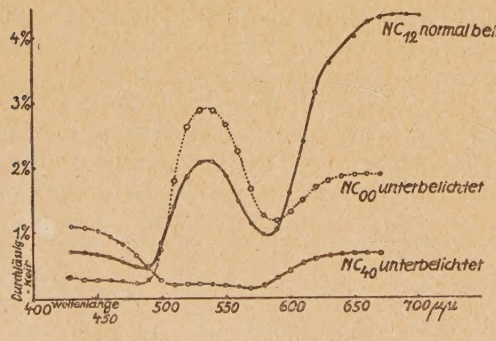


Abb. 5. Durchlässigkeitskurven photographierter Farbplättchen

Die Abb. 5 zeigt die Durchlässigkeitskurven einiger Photogramme. Sie haben alle denselben Typus, ein Maximum bei 530 $\mu\mu$ und an den Enden des sichtbaren Spektrums. Die Lage der beiden Minima ($\sim$ 490 $\mu\mu$, $\sim$ 585 $\mu\mu$) liegt dagegen nicht ganz fest. Die zu den verschiedenen Photogrammen gehörigen Durchlässigkeitskurven unterscheiden sich nur durch die verschieden starke Ausprägung der einzelnen Maxima bzw. Minima. Dieses Verhalten erklärt sich einfach aus der Zusammensetzung der Durchlässigkeit der Photographie aus den Durchlässigkeiten der verschiedenen Körner des Rasters. Die Maxima sind die Stellen größter Transparenz der Körner, während die Minima mit den Stellen zusammenfallen, in welchen sich der Abstieg bzw. Aufstieg der Durchlässigkeitskurven der blauen bzw. grünen Körner und entsprechend der grünen und roten Körner die Wage hält. Es leuchtet ein, daß die Lage der Minima etwas von der Farbe der Photogramme abhängen muß, während die Maxima festliegen müssen.

Aus den Durchlässigkeitskurven $D(\lambda)$ der Photogramme ergeben sich ihre Grunderregungen nach den Formeln

$$r = \int D(\lambda)\, x_1(\lambda)\, d\lambda\,; \quad g = \int D(\lambda)\, x_2(\lambda)\, d\lambda\,;$$
$$b = \int D(\lambda)\, x_3(\lambda)\, d\lambda\,.$$

Die Auswertung dieser Integrale ist nur auf graphischem Wege möglich. Die Kurven $D(\lambda)$ wurden zuerst in geeignetem Maßstab auf Millimeterpapier gezeichnet. Dann wurden die Produktfunktionen $D(\lambda) \cdot x_1(\lambda)$, $D(\lambda) \cdot x_2(\lambda)$, $D(\lambda) \cdot x_3(\lambda)$ gebildet und der Flächeninhalt zwischen diesen Kurven und der $\lambda$-Achse durch Zählen der Quadratmillimeter bestimmt. Diese Flächeninhalte ergeben die Grunderregungen. Aus ihnen bestimmt sich die Lage der Farben im Farbdreieck in bekannter Weise.

Natürlich erhält man auf diese Weise die Farben, welche die Photographien bei Beleuchtung mit Sonnenlicht zeigen. Die Form der Durchlässigkeitskurven ist nämlich von der Wahl des Beleuchtungslichtes ganz unabhängig, denn bei der Bildung des Quotienten

$$\frac{\text{durchgehendes Licht}}{\text{einfallendes Licht}}$$

fällt die besondere Eigenschaft des benutzten Lichtes heraus. Indem man bei der Berechnung der Grunderregungen die für das Sonnenlicht geltenden Königschen Kurven benutzt, setzt man stillschweigend voraus, das eingefallene Licht sei Sonnenlicht gewesen. Die Durchlässigkeitskurven geben dann die Menge des durchgelassenen Sonnenlichtes an. Die Integrale $\int D(\lambda)\, x(\lambda)\, d\lambda$ bestimmen demgemäß die Farbe der Photogramme

bei Beleuchtung mit Sonnenlicht für das Auge Königs.

Von großer Bedeutung für die Güte einer Farbenaufnahme ist die Wahl der Belichtungszeit. Um ihren Einfluß zu untersuchen, wurden in derselben Weise die Farben einer unterbelichteten und einer überbelichteten Photographie des Farbkreises *nc* bestimmt. Die Abb. 6 auf Tafel I bringt die Farben der drei Aufnahmen zur Darstellung. Die voll ausgezogene Kurve stellt den Originalkreis dar, die drei anderen Kurven in der Reihenfolge von außen nach innen, den unter-, normal- und überbelichteten Kreis.

Von vornherein läge die Annahme nahe, daß der photographierte Farbkreis, wenigstens soweit er normal oder überbelichtet ist, den Originalkreis an Sättigung nicht übertrifft. Wie die Abb. 6 zeigt, ist das keineswegs der Fall, denn im Gebiet der hellgrünen Farbtöne ragt selbst die überbelichtete Photographie stark über das Original hinaus. Erst recht ist das beim normal- und unterbelichteten Farbkreise der Fall. Man erkennt ferner, daß die Farbpunkte im allgemeinen um so weiter nach außen rücken, also um so gesättigter erscheinen, je kürzer man die Belichtungszeit wählt. Eine Ausnahme machen nur die grünen Farben. Diese stauen sich alle an einer geradlinigen Grenze, über welche sie ersichtlich nicht hinauszudringen vermögen, wie kurz man auch die Belichtungszeit wählt. Dieses Verhalten wirkt um so auffallender, als der Originalkreis gerade im Bereich der grünen Farben bedeutend über die besagte Grenze hinausragt. Der Grund dafür liegt offenbar darin, daß die grünen Photogramme unmittelbar an der Grenze des Rasterfarbdreiecks liegen.

Zur Nachprüfung dieses Schlusses mußten die Farben des Rasters bestimmt werden.

## § 6. Die Transmissionsfunktion der Farbkörner und das Dreieck der Rasterfarben

Die Bestimmung der Farben des Rasters geschah auf dem Wege über die Durchlässigkeitskurven. Die Größe der Farbkörner ist bei der Agfa-Farbenplatte — mit dieser wurden die Aufnahmen gemacht — sehr verschieden (3—18 $\mu$), dürfte aber im Mittel etwas über 10 $\mu$ betragen, so daß auf den Quadratmillimeter der Platte etwa 7 — 10000 Stück entfallen. Die direkte Messung der Durchlässigkeit eines einzelnen Kornes ist wegen seiner geringen Größe nicht möglich. Es wurde daher mit dem Mikroskop ein vergrößertes Bild eines Kornes auf den Photometerspalt projiziert. Zu diesem Zweck wurden in der durch Abb. 4 dargestellten Apparatur die Linsen $L_1$ und $L_2$, sowie die Blende $B_1$ herausgenommen und statt dessen ein Mikroskop so eingesetzt, daß seine optische Achse mit der des Photometers in einer Geraden lag. Bei dieser Anordnung gelangen im wesentlichen nur parallele Lichtstrahlen in das Photometer. Deshalb sieht man in der Mitte des Gesichtsfeldes nur eine helle Linie. Durch Vorsetzen einer Mattscheibe vor den Spalt des Photometers kann man das Gesichtsfeld einigermaßen gleichmäßig erhellt bekommen; doch ist die Helligkeit dermaßen gering, daß selbst an den Stellen größter Durchlässigkeit eine Messung kaum möglich ist.

Aus diesem Grunde mußte versucht werden, mehrere Körner zur Beleuchtung des Objektivspaltes zu benutzen. Die Abb. 7 zeigt, wie das in einfacher Weise erreicht werden konnte.

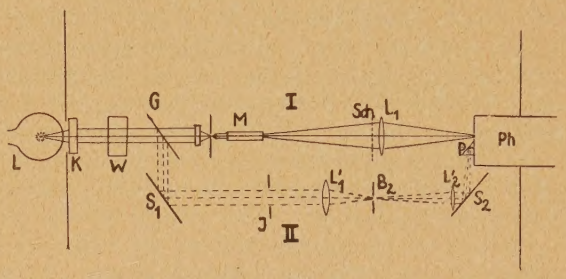


Abb. 7. Anordnung zur Bestimmung der Durchlässigkeit der Rasterkörner

Das Bild des Rasters wurde zunächst von einem Schirm *Sch*, der sich in etwa 40 cm Abstand vom Mikroskopokular befand, in etwa tausendfacher Vergrößerung aufgefangen. Auf dem Schirm wurde die Form der zu messenden Körner — etwa der roten — nachgezeichnet. Durch Ausschneiden dieser Stellen entstand dann eine Blende, welche nur die von den roten Körnern ausgehenden Strahlen durchließ. Hinter dem Schirm befand sich eine Linse $L_1$ von etwa 8 cm Durchmesser und 25 cm Brennweite, welche die Strahlen auf den Spalt des Photometers warf. Auf diese Weise konnte man etwa 20 Körner zur Photometrie benutzen, so daß die Messung durchaus möglich war.

Das Ausschneiden der Blende und das genaue Einsetzen derselben an den früheren Ort ist etwas umständlich. Auch verlangten die grünen Körner zur sicheren Bestimmung ihrer Farbe eine genauere Messung der Blaudurchlässigkeit, mit anderen Worten eine größere Helligkeit, als mit der erwähnten Methode zu erreichen war. Zur Herstellung der Blende wurde deshalb ein anderes Verfahren eingeschlagen: Als Schirm *Sch* wurde ein starkes, weißes Papier genommen, das in feuchtem Zustande mit Tischlerleim über die kreisförmige Öffnung (11 cm Durchmesser) eines Brettchens geklebt wurde, so daß es nach dem Trocknen ganz straff gespannt war. Auf diesen Schirm wurde durch das Objektiv des Mikroskops (ohne Okular) ein Bild des Rasters entworfen.

Die Vergrößerung war etwas mehr als hundertfach. Die Farbfelder hatten daher im Mittel etwa 1,5 mm Durchmesser und waren sehr lichtstark. Handelte es sich nun z. B. um die Messung der roten Körner, so wurden auf dem Schirm die roten Stellen mit einer Nadel in der Mitte durchstochen, so daß das rote Licht durchtreten konnte. Durch dieses Verfahren konnten weit über 100 Körner der Messung zugänglich gemacht werden. In der Farbe der einzelnen Körner treten deutliche Unterschiede auf, vermutlich wegen ihrer verschiedenen Dicke. Die Verwendung einer größeren Anzahl von Körnern zur Messung hat daher den weiteren Vorteil, daß man einen Mittelwert für die Farbe bzw. Durchlässigkeit der Körner bekommt.

Im Interesse einer gleichmäßigen Beleuchtung des Gesichtsfeldes wurde der Photometerspalt mit einer Mattscheibe bedeckt, und zwar so, daß die zerstreuende Fläche der Mattscheibe dem Spalte zugekehrt war. Denselben Dienst leistete bei geringerer Helligkeitseinbuße ein Streifen mattes Papier, welches auf den Spalt geklebt wurde.

Als Beleuchtungsquelle diente bei den ersten Messungen eine starke Kohlenbogenlampe. Doch bleichten unter ihrem intensiven Licht die Farben der Körner rasch aus. Deshalb wurde eine Projektionsosramlampe von 300 Watt benutzt. Um das Ausbleichen tunlichst zu vermeiden, wurde hinter dem Wasserkasten ein Schirm angebracht, der vom Beobachtungsort aus hochgezogen werden konnte und nach Einstellung des Nikols sofort wieder heruntergelassen wurde. Die Gesamtdauer der Belichtung wurde dadurch so weit herabgesetzt, daß die Ausbleichung ganz unmerklich war.

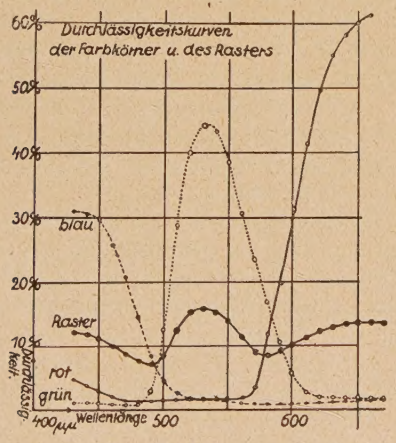


Abb. 8

Die Abb. 8 zeigt die Durchlässigkeitskurven der drei verschiedenen Farbkörner. Bei ihrer Ausrechnung wurde die Abhängigkeit des Nullpunkts von der Wellenlänge berücksichtigt, weil diese ganz beträchtlich war. Am genauesten ist die Grünkurve gemessen,

Über die Messung der Durchlässigkeit sei noch folgendes erwähnt: Wegen der Ausbleichung der Körner wurde in den Gebieten größerer Durchlässigkeit, sofern sie im Bereich der hellen Spektralfarben lagen, die Lichtstärke der Lampe erheblich herabgesetzt. Später zeigte sich eine sehr deutliche Abhängigkeit der Einstellung von der Intensität des auffallenden Lichtes. Dieser Umstand ist nur bei den grünen Körnern berücksichtigt, indem bei ihrer Messung durchweg mit gleicher Intensität gearbeitet wurde. Im Gebiet der blauen Strahlen machte sich noch eine andere Fehlerquelle bemerkbar. Das Photometer läßt nämlich auf irgendeine Weise eine geringe Menge diffuses Licht durch, welches das gesamte Gesichtsfeld etwas erhellt. Diese falsche Strahlung rührt in der Hauptsache von dem Vergleichslicht (Lichtweg II in Abb. 7) her, da dieses Licht im Interesse größerer Helligkeit ziemlich stark gewählt wurde und das von den Farbkörnern kommende Licht an Intensität weit übertraf. Im Gebiet der hellen Spektralfarben fällt das falsche Licht nicht weiter auf, auch wenn die Durchlässigkeit ganz gering ist. Dagegen macht es sich deutlich bemerkbar, wenn die Gebiete geringer Durchlässigkeit im blauen Ende des Spektrums liegen. Dieser Fall liegt bei den roten und namentlich den grünen Körnern vor. Zum Beispiel lassen die grünen Körner nur etwa 1 % der blauen Strahlen durch. Ihre Helligkeit ist nur noch von der Größenordnung der Helligkeit der falschen Strahlung, so daß durch Überlagerung der letzteren die Messungen zu große Werte ergeben. Den Einfluß der falschen Strahlung kann man zurückdrängen, indem man das Vergleichslicht abschwächt. Diesem Zwecke diente die Irisblende $J$, durch welche das Vergleichslicht im blauen Teil des Spektrums auf etwa den 6. Teil reduziert wurde. Allerdings wurde nur bei den grünen Körnern in dieser Weise gemessen. Der Anstieg der Rotkurve im blauen Spektralgebiet ist daher vielleicht gar nicht reell. Auf alle Fälle ist jener Teil der Rotkurve nur als obere Grenze für die Blaudurchlässigkeit zu bewerten.

Aus den Durchlässigkeitskurven $D_r(\lambda)$, $D_g(\lambda)$, $D_b(\lambda)$ der roten, grünen und blauen Körner muß sich durch Multiplikation mit den relativen Flächeninhalten der betreffenden Körner und nachfolgende Addition die Durchlässigkeit $D(\lambda)$ des Farbrasters ergeben. Zur Bestimmung der relativen Flächeninhalte $f_r$, $f_g$, $f_b$ setzt man für drei Wellenlängen $\lambda_1$, $\lambda_2$, $\lambda_3$ die Gleichungen an:

$$D(\lambda_1) = f_r D_r(\lambda_1) + f_g D_g(\lambda_1) + f_b D_b(\lambda_1),$$
$$D(\lambda_2) = f_r D_r(\lambda_2) + f_g D_g(\lambda_2) + f_b D_b(\lambda_2),$$
$$D(\lambda_3) = f_r D_r(\lambda_3) + f_g D_g(\lambda_3) + f_b D_b(\lambda_3).$$

Die Wellenlängen $\lambda_1$, $\lambda_2$, $\lambda_3$ nimmt man zweck-

mäßig im roten, grünen und blauen Teile des Spektrums an.

In Abb. 9 sind die mit den relativen Flächeninhalten multiplizierten Durchlässigkeitskurven der Farbkörner nochmals aufgetragen. Aus ihnen müßte sich durch Addition die Durchlässigkeit des Rasters ergeben. Man sieht, daß das im großen und ganzen zutrifft. Eine vollkommene Übereinstimmung ist gar nicht zu erwarten, auch wenn man von den Meßfehlern absieht. Die einzelnen Farbkörner sind nämlich durch feine Linien voneinander getrennt. Das Licht, welches an diesen Stellen durchtritt, muß natürlich Abweichungen bedingen.

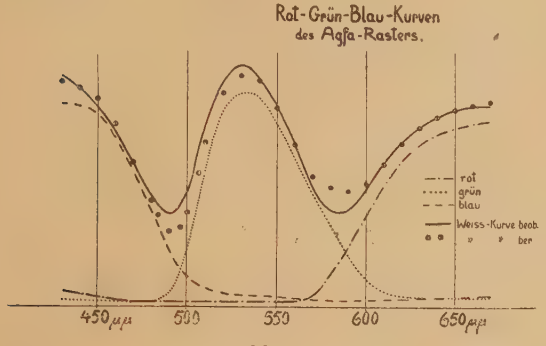


Abb. 9

Die Punkte $R_A$, $G_A$, $B_A$ in Abb. 6 auf Tafel I stellen die Farben der Körner dar, wie sie sich aus den Durchlässigkeitskurven berechnen. Man sieht, daß die Farben aller Photogramme innerhalb des Rasterdreiecks liegen, wie es nach den Mischungsgesetzen in Verbindung mit der Gültigkeit des Schwerpunktsatzes der Fall sein muß. Bezüglich der Genauigkeit der Farbenbestimmung sei allgemein folgendes bemerkt: Die Rot- und Grünerregung läßt sich ziemlich genau messen. Die wirkliche Lage eines Farbpunktes wird daher von der durch den gemessenen Punkt und den Blaupunkt gelegten Geraden nur sehr wenig abweichen. Dagegen sind die Fehlergrenzen in Richtung dieser Geraden erheblich größer, weil sich die Blauerregung viel weniger sicher erfassen läßt. Insbesondere würde der Punkt $R_A$ beträchtlich weiter nach außen zu liegen kommen, wenn der Anstieg der Rotkurve im blauen Ende des Spektrums sich nicht als reell erweisen sollte. Die Lage des Punktes $G_A$ dürfte sich dagegen kaum noch ändern, weil die Durchlässigkeit der grünen Körner wiederholt sorgfältig gemessen wurde.

Die Photogramme der grünen Farben des Ostwaldschen Farbkreises *nc* liegen ganz am Rande des Rasterdreiecks. Man erkennt darin den inneren Grund dafür, daß es auch durch starke Unterbelichtung nicht möglich ist, mit dem photographierten Kreis an den Originalkreis heranzukommen.

Die Punkte $W_1$, $W_2$, $W_3$ in Abb. 6 auf Tafel I stellen die unter-, normal- und überbelichtete Photographie eines weißen Pigmentes dar. Sie besitzen ersichtlich eine grünliche Farbe. Offenbar ist bei der Agfa-Farbenplatte die Grünempfindlichkeit etwas zu stark betont. Dafür spricht auch der Umstand, daß die photographierten Farbkreise von der dem Grünpunkt gegenüberliegenden Seite $R_A B_A$ des Rasterdreiecks einen verhältnismäßig großen Abstand besitzen.

## § 7. Farbton, Sättigung und Helligkeit der Photogramme im Vergleich zum Original

Die Wiedergabe der Farben durch die Photographien (Abb. 6) ist im allgemeinen ganz befriedigend, sofern man von Sättigungsunterschieden absieht. Am besten ist sie natürlich bei der normal belichteten Photographie. Doch scheinen sich die photographierten Kreise der Form nach mehr dem Rasterdreieck als dem Originalkreise anzupassen. Größere Farbtonunterschiede treten beim normal belichteten Kreise namentlich im Gebiet der grünen Farben auf. Diese sind in der Photographie durchweg gegen Hellgrün verschoben. Bei den dunkelgrünen Farben sind diese Farbunterschiede in Wirklichkeit gar nicht so groß, als es der rein räumliche Unterschied in der Abbildung auf den ersten Blick vermuten läßt; denn auch die Spektralfarben sind in diesem Gebiet weit auseinandergelegt, und zudem ist die Farbempfindlichkeit des Auges daselbst nicht besonders groß.

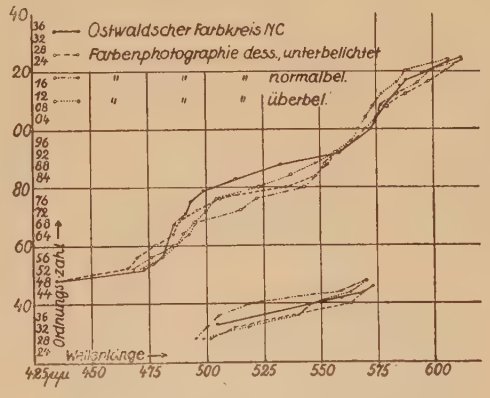


Abb. 10. Farbwiedergabe der Agfaplatte

Deutlicher als in Abb. 6 treten die Farbtonunterschiede zwischen Original und Photographie bei der Abb. 10 in Erscheinung. Man erkennt: gute Farbtonwiedergabe im roten, gelben und blauen Spektralbereich, starke Abweichungen bei den grünen Farben.

Die Abb. 11 und 12 zeigen die Sättigung des Originalkreises und der photographierten Kreise in Abhängigkeit vom Farbton (Wellenlänge) und

von der Ordnungszahl, welche den betreffenden Pigmenten zukommt. In beiden Abbildungen sieht man deutlich, daß bei allen drei Photographien die blaugrünen und dunkelgrünen Farben hinter dem Original an Sättigung zurückstehen, die hellgrünen dagegen das Original übertreffen.

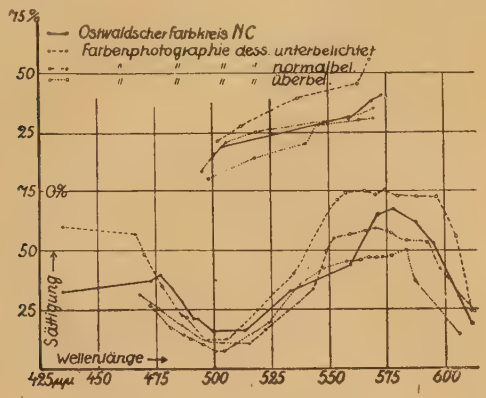


Abb. 11. Sättigungswiedergabe der Agfaplatte als Funktion der Wellenlänge

Aus den Sättigungskurven der Abb. 11 und 12 geht auch nochmals hervor, daß die Photogramme mit wachsender Belichtungszeit immer weißlicher werden. Man könnte glauben, daß sie unter Er-

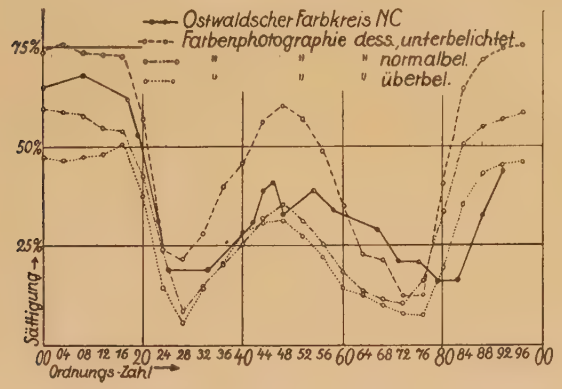


Abb. 12. Sättigungswiedergabe der Agfaplatte als Funktion der Ordnungszahl des Farbkreises

haltung des Farbtons direkt auf den Weißpunkt zurücken, wenn die Exposition steigt. Wenn man sich in Abb. 6 entsprechende Photogramme durch gerade Linien verbunden denkt, so erkennt man, daß das keineswegs zutrifft. Der entstehende Linienzug weist nur bei den gelben und blauen Farben ungefähr auf den Weißpunkt hin. Dagegen weicht er bei den grünen und namentlich den Purpurfarben von dieser Richtung sehr stark ab und zeigt außerdem ganz auffallende, regelmäßige Knicke. Die besagten Farben des unterbelichteten Kreises rücken bei weiterer Belichtung zunächst gegen den Blaupunkt $B_A$, um sich bei noch stärkerer Belichtung von diesem wieder zu entfernen. Dieses Verhalten tritt auch in Abb. 10 zutage, indem dort bei den grünen und den Purpurfarben der unter- und überbelichtete Kreis dem Farbtone nacheinander ziemlich nahe stehen und im selben Sinne vom normal belichteten Kreise abweichen.

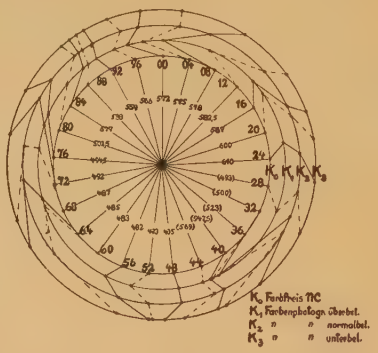


Abb. 13. Farbtonwiedergabe der Agfaplatte

Besser kann man den Sachverhalt aus Abb. 13 ablesen, wo die Farbtöne der Photogramme auf konzentrischen Kreisen zur Darstellung gebracht und durch die Ordnungszahlen der Originalblättchen gleichen Farbtons charakterisiert werden. Man erkennt wieder deutlich die erwähnten Knicke. Die Tatsache, daß die betreffenden Photogramme bei stärkerer Belichtung alle vom Blaupunkt abrücken, legt die Vermutung nahe, daß bei ihnen die photographische Schicht hinter den blauen Körnern schon weitgehend verbraucht ist, und deshalb die Blaudurchlässigkeit nicht mehr in dem der auffallenden Strahlen entsprechenden Maße gesteigert werden kann. Mit einer solchen Annahme ist aber das Wandern der Punkte gegen den Blaupunkt bei noch stärkerer Belichtung unvereinbar.

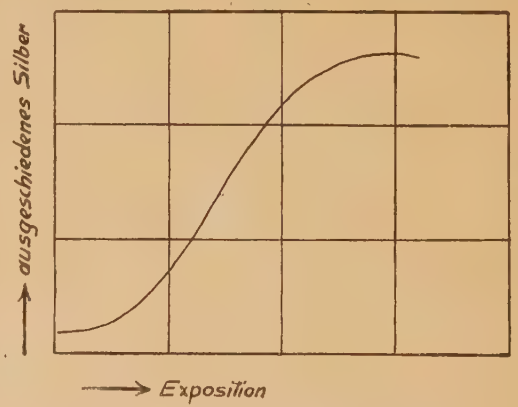


Abb. 14. Abhängigkeit der Silberausscheidung von der Expositionsdauer

Zu einer Deutung, welche wenigstens den Tatsachen nicht widerspricht, gelangt man dagegen, wenn man das Verhalten der lichtempfindlichen Schicht in Abhängigkeit von der Exposition näher betrachtet.

Die Abb. 14 zeigt eine sehr wesentliche Eigenschaft der Platte. Die Menge des ausgeschiedenen Silbers in Abhängigkeit von der auffallenden Lichtmenge wird nicht durch eine Gerade, sondern durch eine Kurve von **S**-förmiger Gestalt wiedergegeben.[3]) Zwischen der Durchlässigkeit $D$ der photographischen Schicht und der Menge $S$ des ausgeschiedenen Silbers besteht die Beziehung $D = e^{-KS}$. Setzt man die Menge des auf der Platte überhaupt vorhandenen Silbers gleich 1, so gilt für die Durchlässigkeit der umgekehrten Photographie offenbar $D = e^{-K(1-S)}$. In Abhängigkeit von der Exposition dargestellt, wird diese Gleichung für die Durchlässigkeit $D$ der umgekehrten Photographie eine Kurve ergeben, die eine ähnliche **S**-förmige Gestalt besitzt wie die Kurve in Abb. 14.

Betrachten wir nun in Abb. 6 auf Tafel I zunächst die Purpurfarben, bei denen die erwähnten Knicke auftreten. Sie liegen alle links von der Geraden, welche durch den Grünpunkt $G_A$ und den (nahe mit dem Weißpunkt zusammenfallenden) Rasterpunkt $W_R$ geht. Demnach muß die photographische Schicht bei ihnen hinter den roten Körnern am stärksten aufgehellt sein. Beim unterbelichteten Kreise besitzt z. B. die photographische Schicht hinter den roten Körnern etwa 10% Durchlässigkeit; hinter den blauen Körnern ist sie etwas geringer, wenn auch von gleicher Größenordnung. Die unterbelichteten Purpurphotogramme liegen also hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit noch im unteren Teil der Kurve in Abb. 14. Bei weiterer Belichtung wird daher zunächst die Durchlässigkeit der Stellen der photographischen Schicht, welche schon die größte Durchlässigkeit besitzen, also in unserem Fall der Gebiete hinter den roten Körnern, die größte Steigerung erfahren. Die Farben der Photogramme werden sich daher nach Rot verschieben. Treibt man die Belichtung noch weiter, so daß man in den oberen Teil der Abb. 14 kommt, so tritt eine Umkehr ein, indem die Durchlässigkeit hinter den blauen Körnern den stärksten Zuwachs erfährt. Die Photogramme werden daher wieder gegen Blau rücken. Dieser Fall dürfte bei dem überbelichteten Kreise vorliegen. Die Durchlässigkeit seiner photographischen Schicht hinter den roten Körnern der Purpurfarben beträgt etwa 70%.

Ganz entsprechend erklärt sich das Verhalten der grünen Photogramme. Diese liegen links von der Geraden durch den Weißpunkt (genauer Rasterpunkt) und den Punkt $R_A$. Daher ist die Aufhellung hinter den grünen Körnern am stärksten. Bei wachsender Belichtung werden sie folglich zunächst gegen Grün rücken und dann wieder gegen Blau zurückkehren. Diese Betrachtungen sollen natürlich nur rein qualitativ eine Möglichkeit zur Erklärung der Knicke andeuten. Zu ihrer Nachprüfung müßte vor allen Dingen die Durchlässigkeit der photographischen Schicht in Abhängigkeit von der Exposition, also eine sog. Schwärzungskurve, aufgenommen werden. Auch wäre es notwendig, die Farben der Photogramme durch wiederholte genaue Messungen nachzuprüfen.

Wenn eine Farbenaufnahme naturgetreu sein soll, so muß sie nicht nur die Farbqualität richtig wiedergeben, sondern es müssen auch die Farben der Photographie im selben Helligkeitsverhältnis stehen wie die Farben des Originals. Die Abb. 15

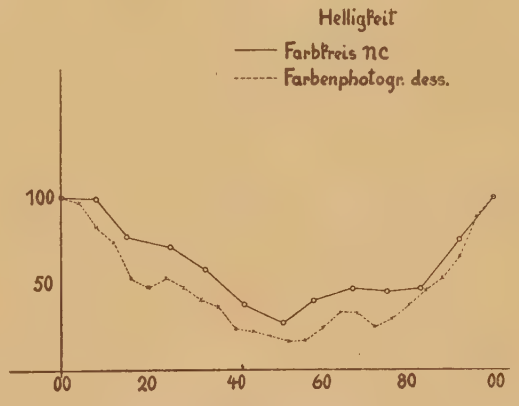


Abb. 15. Helligkeitswiedergabe der Agfaplatte

zeigt, wieweit das beim Farbkreise $nc$ und seiner normal belichteten Photographie zutrifft. Die Helligkeiten wurden aus den Grunderregungen $r$, $g$, $b$ mit Hilfe der Formel $H = K_1 r + K_2 g + K_3 b$ berechnet und dabei für $K_1$, $K_2$, $K_3$ die von F. Exner bestimmten Werte zugrunde gelegt.[4]) Ganz willkürlich wurde die Helligkeit des Pigments 00 im Original und der Photographie = 100 angenommen, da es nur auf das Helligkeitsverhältnis ankommt. Auffallend sind die großen Unterschiede in der Helligkeit bei den dunklen Farben.

## § 8. Der komplementäre Farbkreis

Wenn man eine Farbenplatte nach dem bei gewöhnlichen Platten üblichen Verfahren entwickelt, so ist sie gerade hinter denjenigen Farbkörnern am stärksten verdunkelt, deren Farbe der Farbe des aufgefallenen Lichtes am nächsten steht. Eine solche Platte wird z. B. nach Belichtung mit rotem Licht hauptsächlich grünes und blaues Licht durchlassen, nach Belichtung mit blauem Licht hauptsächlich rotes und grünes usw., kurz, man übersieht, die Platte wird die photographierten

[3]) Mees u. Scheppard, Zeitschr. f. Photophysik **3** (1905).

[4]) Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Mathem.-naturw. Klasse, Abteilung IIa, 129. Bd., 1. Heft 1920.

Objekte in komplementärer Farbe wiedergeben. Die Farben einer derartigen nicht umgekehrten, normal belichteten Aufnahme des Farbkreises *n c* zeigt die Abb. 16 auf Tafel I. Zum Vergleich ist die unter denselben Bedingungen hergestellte, umgekehrte, normal belichtete Photographie hinzugezeichnet. Man sieht, daß nur die Photogramme der gelben und hellroten, sowie der blauen Pigmente zueinander annähernd komplementär sind, im übrigen aber erhebliche Abweichungen auftreten.

Strenge Komplementarität ist im übrigen auch gar nicht zu erwarten. Eine solche kann nur eintreten, wenn man annimmt, daß die Absorption der photographischen Schicht der ausgeschiedenen Silbermenge proportional ist und den Wert 1 erreicht, wenn alles Silber ausgeschieden ist. Die Durchlässigkeiten der photographischen Schicht an entsprechenden Stellen des umgekehrten und nicht umgekehrten Kreises müssen sich dann überall zu 1 ergänzen. Beide Bilder übereinander projiziert, ergeben somit an allen Stellen die Farbe des Rasters. Die entsprechenden Photogramme sind also komplementär zueinander, wenigstens mit der Annäherung, in der das Rasterweiß mit dem Sonnenweiß übereinstimmt.

Man kann die Bedingung der Komplementarität auch leicht mathematisch formulieren. Es ist dabei zweckmäßig, das Dreieck der Rasterfarben als Koordinatendreieck zu benutzen und die Einheiten in diesem Koordinatensystem so zu wählen, daß der Rasterpunkt Einheitspunkt wird.

Die neuen Koordinaten $x_1$, $x_2$, $x_3$ haben eine einfache physikalische Bedeutung. Sie geben nämlich die Durchlässigkeit der photographischen Schicht hinter den roten, grünen und blauen Körnern an. Damit eine Farbe $x_1$, $x_2$, $x_3$ komplementär zu einer zweiten $x_1'$, $x_2'$, $x_3'$ ist, muß gelten: $\begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ x_1' & x_2' & x_3' \end{vmatrix} = 0$. Denn beide Farben müssen mit dem Rasterpunkt auf einer Geraden liegen. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn die Absorption der Platte dem ausgeschiedenen Silber proportional ist; denn in diesem Falle gilt:

$$x_1' = 1 - x_1, \quad x_2' = 1 - x_2, \quad x_3' = 1 - x_3;$$

$$\begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 - x_1 & 1 - x_2 & 1 - x_3 \end{vmatrix} = 0.$$

In Wirklichkeit besteht zwischen Durchlässigkeit $D$ und ausgeschiedenem Silber $S$ eine Beziehung von der Form $D = e^{-KS}$, so daß die Bedingung für die Komplementarität lautet:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{-KS_1} & e^{-KS_2} & e^{-KS_3} \\ e^{-K(1-S_1)} & e^{-K(1-S_2)} & e^{-(1-S_3)} \end{vmatrix} = 0.$$

Diese Gleichung ist im allgemeinen sicher nicht erfüllt. Wenn zwei der Größen $S_1$, $S_2$, $S_3$ einander gleich sind, verschwindet die Determinante. Daß in diesen Fällen komplementäre Farben zu erwarten sind, leuchtet ohne weiteres ein.

Photogramme, bei denen hinter zwei Farbkörnerarten gleich viel Silber ausgeschieden, die Durchlässigkeit der photographischen Schicht also gleich groß ist, lassen sich in Abb. 16 auf Tafel I leicht angeben. Sie liegen alle auf den Geraden durch die Eckpunkte des Farbrasters und den Weißpunkt (genauer Rasterpunkt). Auf diesen Geraden müssen also Punkte liegen, welche die gleiche Ordnungszahl besitzen. Man sieht in Abb. 16, daß das bei der Geraden durch $R_A$ und $W$ keineswegs der Fall ist. Dies ist um so überraschender, als sich unsere Erwartung einzig und allein auf die Annahme stützt, daß gleich stark geschwärzte Teile der photographischen Schicht nach der Umkehrung wieder gleiche Schwärzung besitzen.

Anderseits scheint der Umkehrungsvorgang in ganz gesetzmäßiger Weise zu erfolgen, wie aus folgendem hervorgeht: Verbindet man zwei Punkte der beiden Kreise, welche gleiche Ordnungszahl besitzen, durch eine Gerade, so besitzen — innerhalb der Meßfehler — auch die beiden anderen auf dieser Geraden liegenden Punkte gleiche Ordnungszahlen. Wenn also eine Stelle *a* durch Umkehrung nach *b* rückt, so rückt auch eine bei *b* gelegene Stelle durch Umkehrung ganz in die Nähe von *a*. Könnte man den bereits umgekehrten Kreis nochmals umkehren, so würde man demnach wieder zum nicht umgekehrten Kreise zurückkommen. Allerdings würde dieser Kreis im Vergleich zum ursprünglichen, nicht umgekehrten Kreise weniger gesättigt sein; denn, wie Abb. 16 auf Tafel I zeigt, ist mit der Umkehrung ein Sättigungsverlust verbunden. Der Grund dafür dürfte darin liegen, daß die photographische Schicht bei der Umkehrung sich etwas gegen das Filter verlagert oder etwas deformiert wird, so daß z. B. hinter die roten Körner auch kleine Teile von solchen Gebieten zu liegen kommen, welche eigentlich hinter die grünen oder blauen Körner gehören. Eine derartige Verschiebung wird im Mittel eine vermehrte Weißdurchlässigkeit bewirken. Im übrigen ist es auch möglich, daß die Farben der Körner durch die Umkehrung leiden.

Die Punkte $R_L$, $G_L$, $B_L$ in Abb. 16 stellen die Farben des Rasters der Lumièreplatte dar. Die Abb. 17 zeigt die zu diesen Farben gehörenden Durchlässigkeitskurven. Sie sind von denen der Agfafarben nur wenig verschieden. Bei den grünen Körnern der Lumiereplatte liegt das Maximum der Durchlässigkeit bei etwas kürzeren Wellen. Die grünen und namentlich die blauen Körner zeigen einen sehr starken Anstieg der Durchlässigkeit im roten Ende des Spektrums.

Dieser Anstieg dürfte kaum von nachteiliger Wirkung sein, da er die Farbe der betreffenden Körner fast gar nicht beeinflußt, und die Rotempfindlichkeit der Platte sich nicht mehr auf derart langwellige Strahlen erstreckt.

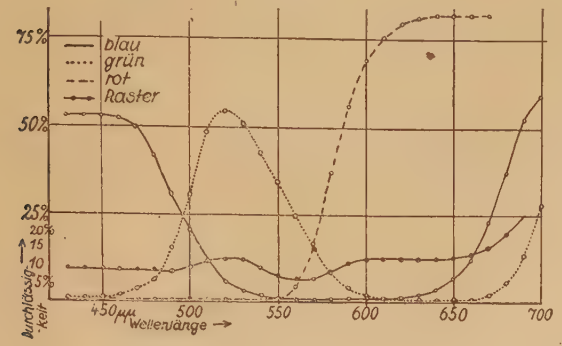


Abb. 17. Durchlässigkeitskurven der Farbkörner und des Rasters der Lumiereplatte

Durch die Messungen der Photogramme des Farbkreises $nc$ ist natürlich die Farbenwiedergabe bei der Agfaplatte keineswegs vollständig erfaßt. Dazu ist das Problem viel zu kompliziert, hängt doch die Wiedergabe einer Farbe nicht allein von der Farbe selbst, sondern auch von der physikalischen Zusammensetzung des diese Farbe bildenden Lichtes ab, und diese kann bei gleicher Farbqualität sehr verschieden sein. Immerhin geben die gemachten Messungen ein ungefähres Bild von der Farbenwiedergabe, welche bei den in der Natur gewöhnlich auftretenden Körperfarben zu erwarten ist. Insoweit nämlich diese Farben durch eine ähnliche Lichtzusammensetzung entstehen, wie sie die hier benutzten Pigmente hatten, ist es gestattet, bei ihnen auch eine Farbenwiedergabe anzunehmen von der Art, wie sie der Farbkreis $nc$ (Abb. 6 auf Tafel I) zeigt.

## § 9. Bemerkungen über die Wahl der Farbkörner

Die Leistungsfähigkeit einer Farbenplatte hängt in erster Linie von der Wahl der Farbenkörner ab, und zwar weniger von deren Farbqualität als von der Form ihrer Durchlässigkeitskurven. Praktisch ist es natürlich unmöglich, Farbkörner herzustellen, bei denen eine vollkommen naturgetreue Wiedergabe aller Farben erfolgt. Vom theoretischen Standpunkt ist dagegen die Frage von Interesse, ob es überhaupt Durchlässigkeitskurven — wenn auch nicht realisierbare — gibt, welche das leisten, oder ob diese je nach der aufzunehmenden Farbe andere Formen annehmen müssen. Wenn man voraussetzt, daß die Aufhellung der photographischen Schicht der Menge des auffallenden Lichtes proportional ist und die Plattenempfindlichkeit sich durch eine Funktion $\varepsilon(\lambda)$ wiedergeben läßt, so kann man zeigen, daß die Durchlässigkeitskurven der Farbkörner folgende Bedingungen erfüllen müssen[5]):

$$x_1(\lambda) = \varepsilon(\lambda)\{\varrho\, r_1\, \varphi_r(\lambda) + \gamma\, g_1\, \varphi_g(\lambda) + \beta\, b_1\, \varphi_b(\lambda)\},$$
$$x_2(\lambda) = \varepsilon(\lambda)\{\varrho\, r_2\, \varphi_r(\lambda) + \gamma\, g_2\, \varphi_g(\lambda) + \beta\, b_2\, \varphi_b(\lambda)\},$$
$$x_3(\lambda) = \varepsilon(\lambda)\{\varrho\, r_3\, \varphi_r(\lambda) + \gamma\, g_3\, \varphi_g(\lambda) + \beta\, b_3\, \varphi_b(\lambda)\}.$$

Hierin bedeuten $\varphi_r(\lambda)$, $\varphi_g(\lambda)$, $\varphi_b(\lambda)$ die Durchlässigkeitskurven der roten, grünen und blauen Farbkörner, $\varrho, \gamma, \beta$ die Flächeninhalte, welche sie einnehmen und $r_1, r_2, r_3$; $g_1, g_2, g_3$; $b_1, b_2, b_3$ ihre Grunderregungen. Die drei linearen Gleichungen sind sicher erfüllbar. Das heißt: unter den gemachten Annahmen gibt es theoretische Durchlässigkeitskurven, bei welchen eine vollkommen naturgetreue Farbenwiedergabe stattfindet. Abb. 18 gibt ihre Form genähert an. Da die Ordinaten der Kurven zum Teil negativ sind, so ist es unmöglich, sie zu realisieren.

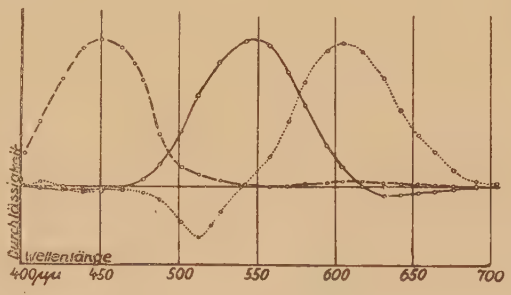


Abb. 18. Theoretische Durchlässigkeitskurven eines Rasters

Bei ihrer Berechnung ist $\varepsilon(\lambda)$ und $\varrho, \gamma, \beta = 1$ gesetzt. Ihre Ordinaten sind zum Teil negativ. Das ist nicht anders zu erwarten, denn sonst würden den Durchlässigkeitskurven drei reelle Farben entsprechen. Beschränkt man sich auf die Forderung, daß die Farbwiedergabe nur farbtongleich erfolgen soll, so gehen die obigen Gleichungen für die Durchlässigkeitskurven über in

$$x_1(\lambda) + c(\lambda) = \varepsilon(\lambda)\{\varrho\, r_1\, \varphi_r(\lambda) + \gamma\, g_1\, \varphi_g(\lambda) + \beta\, b_1\, \varphi_b(\lambda)\},$$
$$x_2(\lambda) + c(\lambda) = \varepsilon(\lambda)\{\varrho\, r_2\, \varphi_r(\lambda) + \gamma\, g_2\, \varphi_g(\lambda) + \beta\, b_2\, \varphi_b(\lambda)\},$$
$$x_3(\lambda) + c(\lambda) = \varepsilon(\lambda)\{\varrho\, r_3\, \varphi_r(\lambda) + \gamma\, g_3\, \varphi_g(\lambda) + \beta\, b_3\, \varphi_b(\lambda)\}.$$

Die Konstante $c(\lambda)$ kann man so wählen, daß die negativen Ordinaten in den Durchlässigkeitskurven verschwinden. Demnach müßte es durch geeignete Wahl der Farbkörner möglich sein, Farbenplatten herzustellen, welche farbtongleiche Bilder liefern, sofern die gemachten Annahmen erfüllt sind. In

[5]) Schrödinger, Müller-Pouillet, Lehrbuch d. Physik, 11. Aufl. 1926.

Wirklichkeit ist das keineswegs der Fall. Insbesondere ist die Aufhellung der Platte der aufgefallenen Lichtmenge nicht direkt proportional, sondern diese Abhängigkeit wird durch eine Kurve von der Form der Abb. 14 dargestellt. Infolgedessen werden die Durchlässigkeitskurven von der physikalischen Zusammensetzung des auffallenden Lichtes abhängig, d. h. es ist durch keine Wahl der Farbkörner möglich, vollkommen farbentreue Bilder zu erhalten.

(Eingegangen am 20. Oktober 1926.)

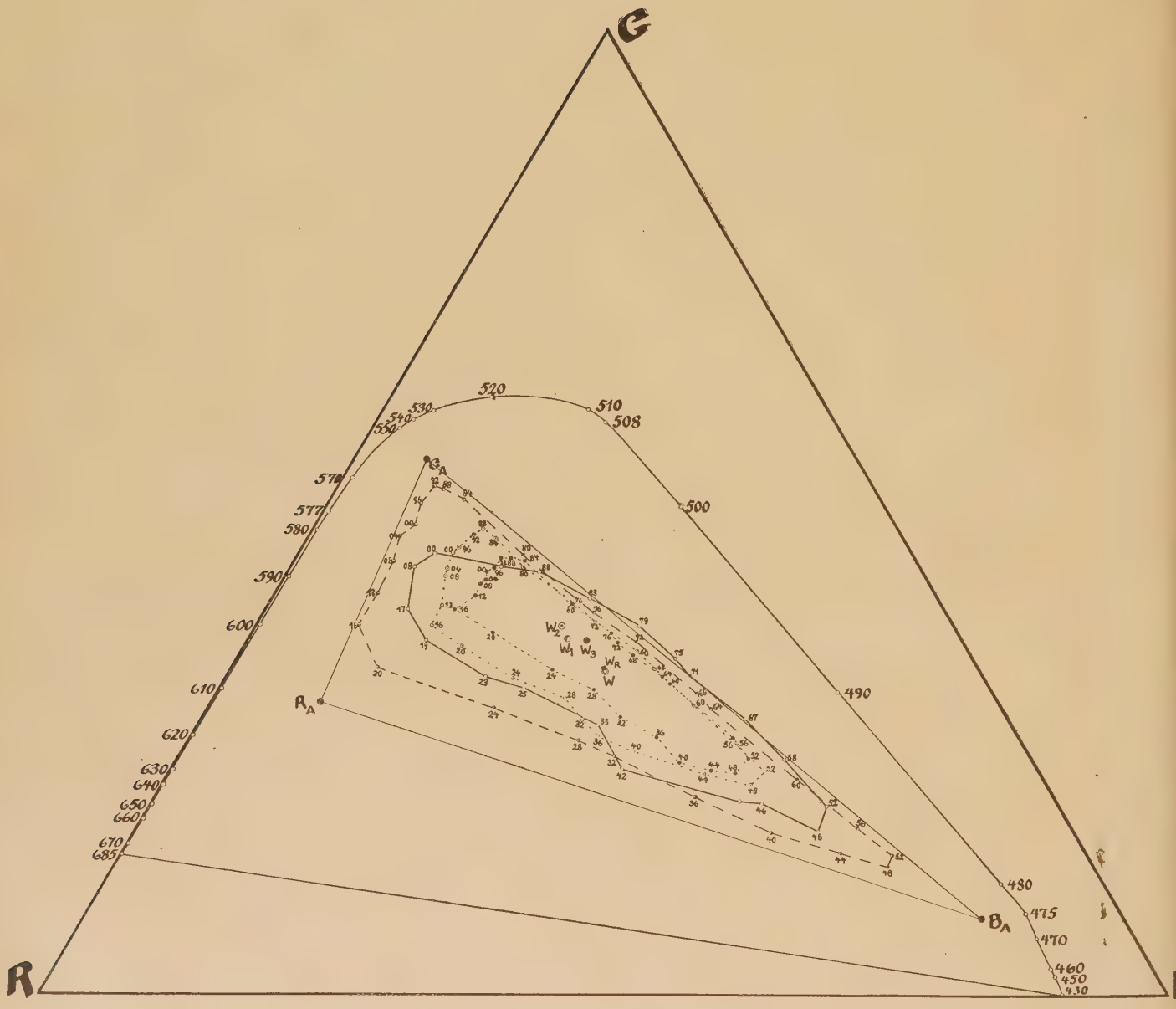


Abb. 6. Lage der Spektralfarben, des Originalfarbkreises *n c* und seiner farbigen Photographien im Farbendreieck



Verlag von Johann

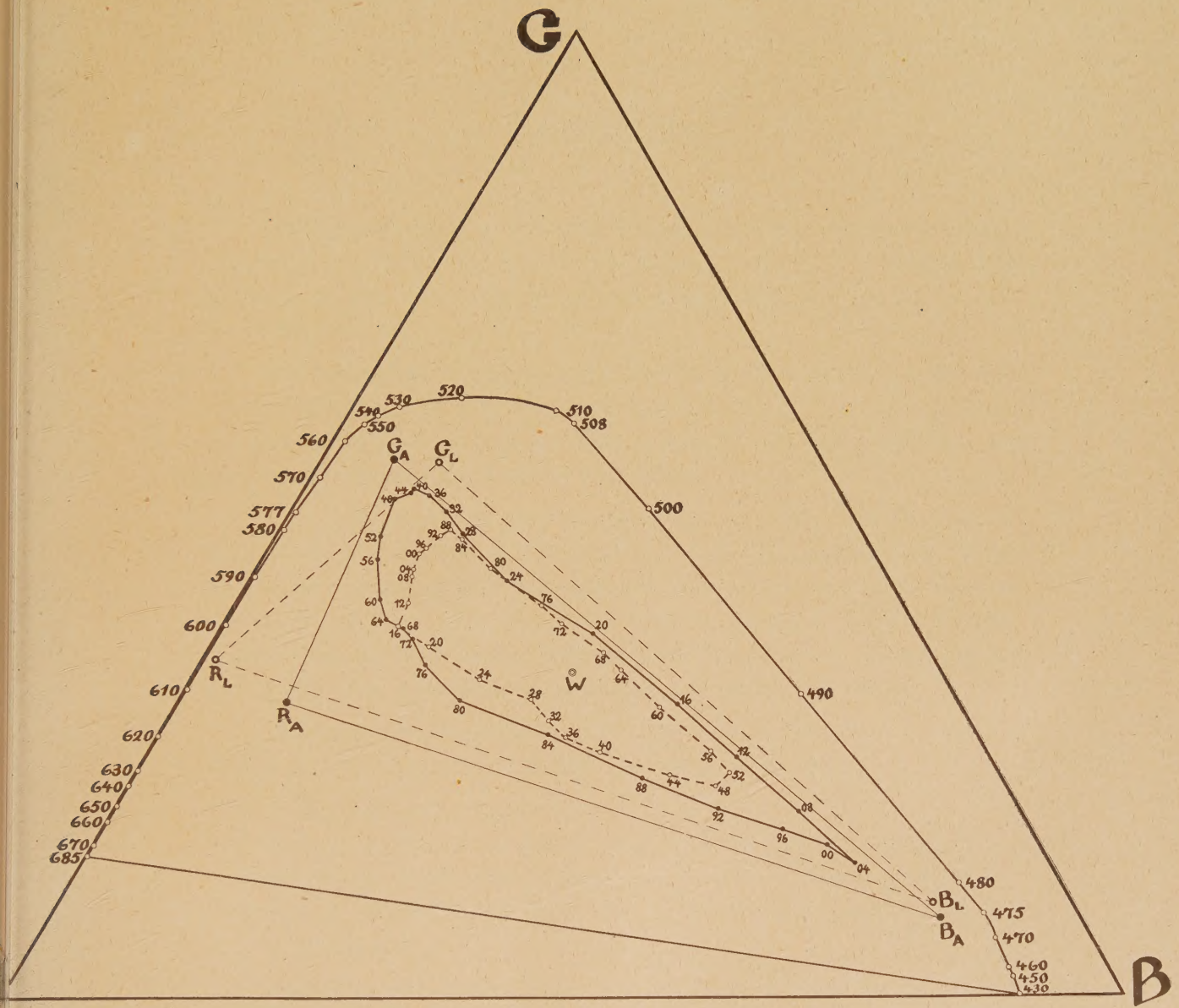


Abb. 16. Lage der Spektralfarben, des umgekehrten und nicht umgekehrten normalbelichteten Farbkreises *n c* im Farbendreieck

ckermann

Barth, Leipzig

# Lebenslauf.

Ich, Karl Ackermann, wurde am 10. Februar 1904 als Sohn des Oberrechnungsrates Ernst Ackermann und seiner Ehefrau Hilda, geb. Blank, in Pfullendorf, Kreis Konstanz, geboren. Ich besitze die badische Staatsangehörigkeit und bin evangelischen Bekenntnisses.

Von Ostern 1910 bis September 1913 besuchte ich die Volksschule in Müllheim i. B. Im September 1913 ging ich auf die dortige Realschule über. Von September 1919 an besuchte ich die Oberrealschule in Freiburg i. Br. und verließ diese Anstalt mit dem Zeugnis der Reife im März 1922.

Vom Sommersemester 1922 bis zum Sommersemester 1923 einschließlich studierte ich an der Universität Freiburg i. Br. Naturwissenschaften, in Sonderheit Mathematik und Physik. Vom Wintersemester 1923 bis Sommersemester 1924 einschließlich setzte ich mein Studium in derselben Richtung an der Universität München fort. Im Wintersemester 1924 kam ich nach Marburg, um mich daselbst bis Oktober 1926 vornehmlich dem Studium der Physik zuzuwenden.

Das Rigorosum bestand ich am 2. Oktober 1926. Seitdem bin ich als Physiker bei der J. G. Farbenindustrie angestellt und wohne in Mannheim.

Meine akademischen Lehrer waren:

in Freiburg die Professoren Heffter, Himstedt, Loewy, Schwarz, Wieland;

in München die Professoren Fajans, Herzfeld, Perron, Sommerfeld, Wien;

in Marburg die Professoren Berek, Hensel, Jaensch, Neumann, F. A. Schulze, Cl. Schaefer.

Ihnen allen, insbesondere Herrn Professor Dr. Cl. Schaefer bin ich zu aufrichtigem Dank verpflichtet.